

Određivanje remanentnog toka u magnetskoj jezgri analiziranjem odziva na testni signal

Oršulić, Marijan

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:440819>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-11**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH
TEHNOLOGIJA OSIJEK**

Sveučilišni studij

**ODREĐIVANJE REMANENTNOG TOKA U
MAGNETSKOJ JEZGRI ANALIZIRANJEM ODZIVA NA
TESTNI SIGNAL**

Diplomski rad

Marijan Oršulić

Osijek, 2021.

Sadržaj

1. UVOD.....	1
2. REMANENTNI MAGNETSKI TOK.....	2
3. LABORATORIJSKI SUSTAV, MJERNA OPREMA I MJERNI POSTUPAK	8
3.1.Laboratorijski sustav	8
3.2.Programski alati.....	11
3.3.Mjerni uređaji.....	12
3.4.Mjerni postupak.....	16
4. PARAMETRI.....	19
4.1.Rezultati mjerenja.....	19
4.2.Parametar I_a	23
4.3.Parametar P_b	26
4.4.Parametar P_c	28
4.5.Parametar W_Q	31
5. ZAKLJUČAK.....	37
Literatura	39
Sažetak.....	40
Životopis.....	41

1. UVOD

Transformatori i zavojnice imaju značajnu ulogu u elektroenergetskim sustavima. Transformatori i zavojnice se primjenjuju prilikom snimanja valnih oblika struje i napona, a važno ih je i obrađivati i snimati. To se najčešće izvodi s pomoću računala, odnosno programskih alata koji su potrebni za postizanje željenih rezultata.

Jedna od primjena prethodno navedenih snimanja, obrađivanja i pohranjivanja valnih oblika struje i napona je određivanje remanentnog toka u jezgri transformatora. Kod isključenja napajanja transformatora dolazi do pojave remanentnog (zaostalog) toka u jezgri. Poznavanje njegove vrijednosti je važno zbog smanjenja udarnih struja transformatora ili zavojnice prilikom uklapanja transformatora, a s pomoću njega se može predvidjeti ferorezonancija te spriječiti zasićenje strujnog transformatora.

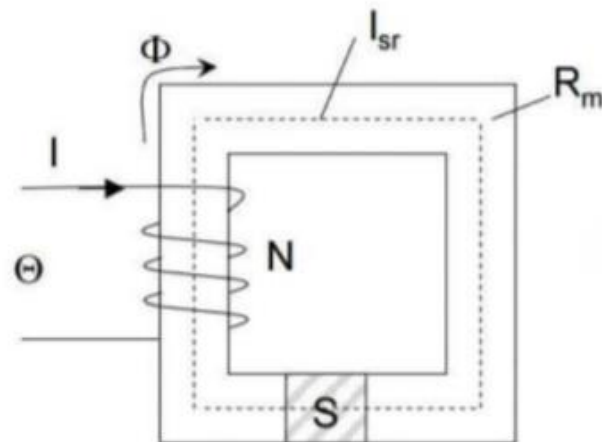
Prilikom izvođenja pokusa analiziranja male petlje histereze, snimani su valni oblici napona primara, sekundara i struja primara transformatora. Obradivanjem navedenih valnih oblika, određene su ostale vrijednosti koje su bile potrebne za računanje remanentnog toka u jezgri transformatora. Snimanje napona i struje vršilo se s pomoću sklopa spojenog na računalo, dok su se ostali valni oblici obrađivali u programskim alatima MATLAB i LabVIEW.

Nakon snimanja i obrade valnih oblika tražili su se parametri s pomoću kojih bi se trebao računati remanentni tok.

U drugom poglavlju ovoga diplomskog rada opisani su osnovni pojmovi poput magnetskog i remanentnog magnetskog toka, ferorezonancije i udarne struje. U trećem poglavlju predstavljen je laboratorijski sustav, mjerna oprema i mjerni postupak. U četvrtom poglavlju objašnjeni su parametri koji su bili traženi za buduće računanje remanentnog toka u jezgri transformatora. U petom poglavlju izveden je zaključak ovoga rada.

2. REMANENTNI MAGNETSKI TOK

Energetski transformatori rade na principu elektromagnetske indukcije, to jest rade poput elektromagneta. Sastoje se od dva dijela, feromagnetske jezgre i svitka (električne zavojnice).



Slika 2.1. *Primjer jednofaznog transformatora sa željeznom jezgrom.*

Razlikujemo homogeno i nehomogeno magnetsko polje. Tok homogenog magnetskog polja indukcije \vec{B} kroz ravnu površinu S se iskazuje kao skalarni produkt vektora površine S i vektora magnetske indukcije \vec{B} . Maksimalan je kada kroz površinu S silnice magnetske indukcije \vec{B} upadaju okomito na nju. Mjerna jedinica magnetskog toka je veber [Wb] [1]. Izražava se kao:

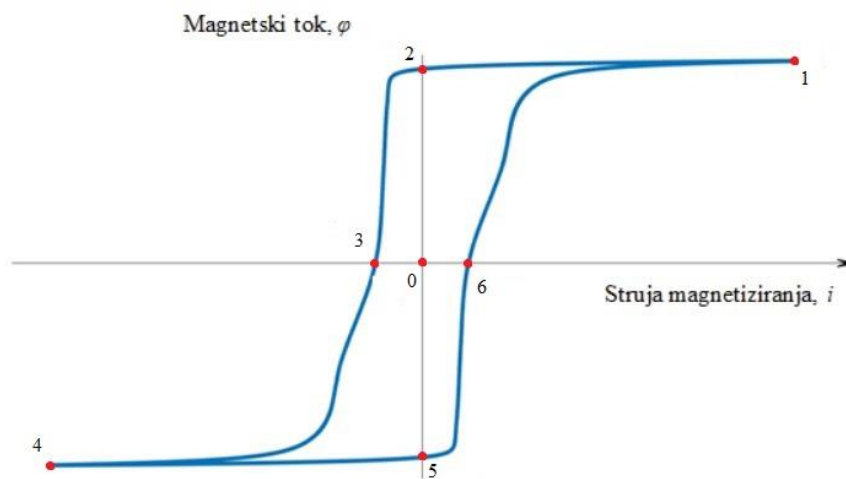
$$\phi = \vec{B} * \vec{S} \quad (2-1)$$

Kod nehomogenog magnetskog polja smjer i intenzitet magnetske indukcije se mijenja između točaka te je potrebno površinu S podijeliti na niz elementarnih površina dS [1]. Računa se kao:

$$\phi = \int_S \vec{B} d\vec{S} \quad (2-2)$$

Određeni materijali poput željeza (Fe), nikla (Ni) i kobalta (Co) spadaju u feromagnetske materijale. Kod takvih materijala, nakon isključenja napajanja se pojavljuje zaostali magnetski tok, odnosno remanentni magnetski tok (Φ_R). On je istosmjernan i konstantan te ga zbog toga ne možemo mjeriti neizravnim metodama jer na priključnicama ne inducira nikakav napon.

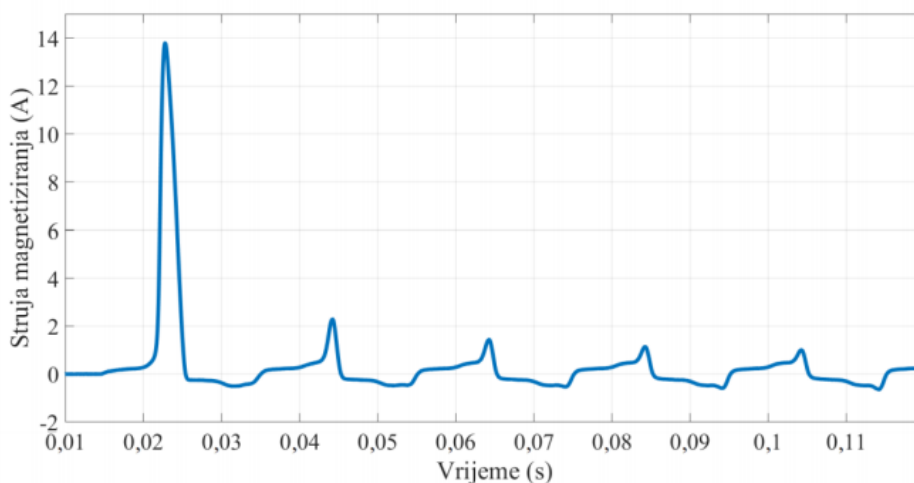
Remanentni magnetski tok uzrokuje probleme kada je njegova vrijednost nepoznata. Najveće probleme stvara kod uklopa neopterećenog transformatora, odnosno transformatora kojem je sekundar u praznom hodu. Najčešći način za prikazivanje magnetskih karakteristika je ϕ - i ravnina. Ona predstavlja ovisnost magnetskog toka (ϕ) o struji magnetiziranja (i). Kada se transformator nalazi u ustaljenom stanju, kao posljedica izmjeničnog napona napajanja, dobiva se zatvorena petlja, odnosno petlja histereze.



Slika 2.2. *Petlja histereze u ϕ - i ravnini.*

Povećavanjem struje koja protječe primarom transformatora, povećava se sila magnetiziranja. Njezinim povećanjem, povećavaju se i magnetska indukcija B te jakost magnetskog polja H sve do točke zasićenja u kojoj indukcija i magnetski tok postaju konstantni, odnosno točke u kojoj se površina petlje ne mijenja. Tu krivulju nazivamo krivuljom prvog magnetiziranja. Nakon toga, vrijednost jakosti magnetskog polja se smanjuje brže nego što se smanjuje vrijednost magnetske indukcije. Kada jakost polja dođe do vrijednosti nula, a magnetska indukcija i dalje ima određenu vrijednost, tada dolazi do pojave koja se naziva remanentni magnetizam B_r . On se s pomoću koercitivne sile H_c dovodi do vrijednosti nula [1].

Jedan od razloga mjerenja remanentnog magnetskog toka je smanjenje udarne struje. Udarne struja je najveća struja koju neki uređaj povuče pri priključenju na napon, a u ovom slučaju taj uređaj je neopterećeni transformator. Udarne struja može uzrokovati razne probleme, posljedice i nepravilan rad sustava [2].



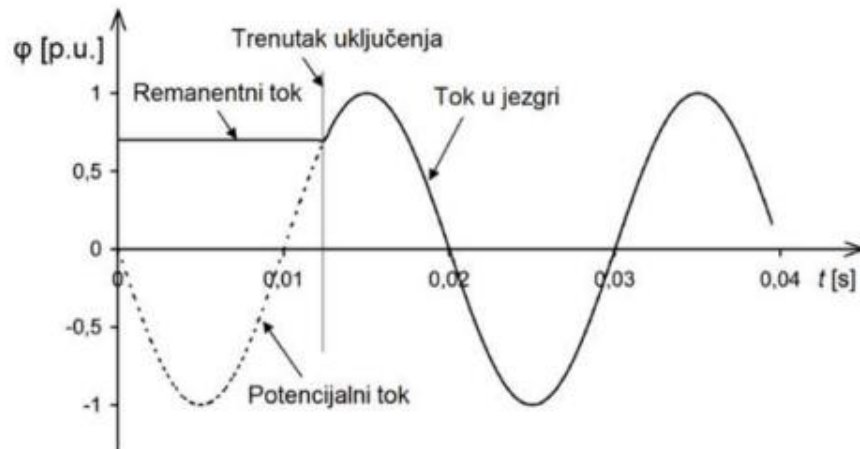
Slika 2.3. *Primjer valnog oblika udarne struje.*

Lenzovo pravilo kaže da inducirana struja ima takav smjer da se njezino magnetsko polje opire magnetskom polju koji je uzrok njezinog nastanka. Zbog tog opiranja dolazi do pojave udarne struje koja može biti 10 do 15 puta veća od vrijednosti nazivne struje nekog električnog stroja, u ovom slučaju transformatora. Jedno od njezinih obilježja je velika vršna vrijednost prve periode (Slika 2.3)

u kojoj dolazi do pojave asimetrije valnog oblika te istosmjerne komponente struje. Njezina vršna vrijednost, valni oblik i trajanje tranzijenata ovise o raznim faktorima, poput faznog kuta uklopa napona napajanja, zaostalog magnetskog toka u jezgri prilikom uklopa, petlje histereze (φ - i karakteristika) i djelatnog otpora namota. Uz nabrojane faktore, na udarnu struju još utječu i vrsta spoja transformatora, njegova energetska konstrukcija, karakteristike prekidača te topologija mreže.

Magnetski tok u jezgri transformatora razmjernan je integralu napona napajanja, odnosno kasni za naponom za 90° . Amplituda magnetskog toka je konstantna, ali posjeduje istosmjernu komponentnu čije je trajanje ovisno o radnom i induktivnom otporu kruga. Na slici 2.2 prikazan je maksimalni magnetski tok (točka 1).

Kontrolirani ili upravljivi uklop najčešće se koristi kao rješenje za smanjenje udarne struje prilikom magnetiziranja. Idealni uklop bi bio uklop kod kojeg bi, prema vrijednosti, remanentni magnetski tok bio jednak magnetskom toku u jezgri transformatora koji uzrokuje napon jednak naponu uklopa u ustaljenom stanju [3, 4]. To znači da bi fazni kut uklopa trebao biti jednak faznom kutu prethodnog isklopa. Optimalan trenutak uklopa (fazni kut uklopa) neopterećenog transformatora bio bi onaj trenutak kada je potencijalni tok izjednačen s remanentnim tokom.



Slika 2.4. Kontrolirani uklop.

Poznavanje vrijednosti remanentnog toka je nužno kako bi se izbjegao raniji uklop, odnosno kako bi se izbjegla razlika vrijednosti između potencijalnog toka i remanentnog toka. Ukoliko bi došlo do ranog uklopa dogodilo bi se naglo povećanje magnetskog toka u odnosu na amplitudu potencijalnog toka i to bi uzrokovalo zasićenje jezgre i pojavu velike udarne struje magnetiziranja. Osim poznavanja vrijednosti remanentnog toka, postoje i drugi načini za smanjenje udarnih struja magnetiziranja kao što su serijski otpori, promjena položaja namota na transformatoru i upotreba virtualnih zračnih raspورا.

Zasićenje jezgre strujnog transformatora unosi distorzije, odnosno uzrokuje poremećaje u radu zaštitnih releja. Najveći utjecaj remanentnog magnetskog toka je uslijed prijelaznih stanja, kod kojih se jezgra dovodi u zasićenje, što uzrokuje izobličenje izlaznih signala. U ustaljenom stanju, remanentni tok nema utjecaj, zbog toga što su tada vrijednosti struje magnetiziranja i magnetskog toka u jezgri jako male. Kod režima rada u automatskom ponovnom uklopu ovaj problem je najizraženiji. Kod pojave kvara i kada prekidač isklopi, u jezgri strujnog transformatora ostaje remanentni tok velike vrijednosti. U slučaju da se kvar ne otkloni prije nego automatski uklop krene u sljedeće uklapanje, dolazi do znatnog izobličenja izlaznog signala jer jezgra ulazi u veliko zasićenje [5]. Neke od metoda za sprječavanje zasićenja jezgre strujnog transformatora su primjena jezgre transformatora načinjene od materijala s visokom permeabilnošću i s niskim maksimalni remanentnim tokom, korištenje elektroničkih strujnih transformatora te korištenjem strujnih transformatora s jezgrom sa zračnim raspovima. Mane prethodno navedenih metoda su cijene i dimenzije strujnih transformatora, zbog čega se u praksi koristi metoda koja ne utječe ni na cijenu ni na konstrukciju strujnog transformatora, a postiže se demagnetiziranjem jezgre dok je transformator u isklopu [5].

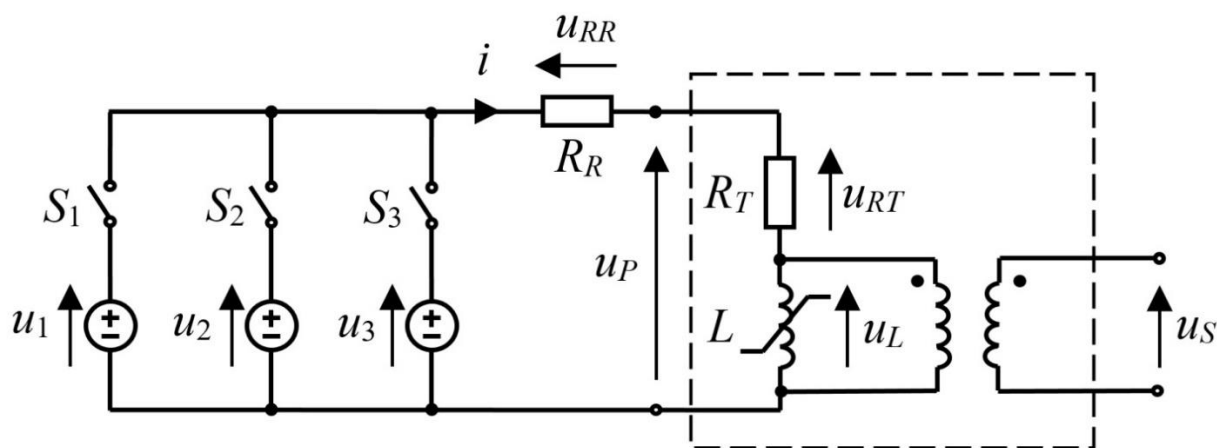
Još jedan problem koji se javlja u sustavima je ferorezonancija. Ferorezonancija se definira kao prijelaz iz monoharmonijskog ustaljenog stanja u višeharmonijsko ustaljeno stanje. Opisuju je izobličeni valni oblici struje i napona te prenaponi. Ferorezonantna stanja su sva ustaljena stanja koja nisu monoharmonijska. Ovaj fenomen rezonancije je nepredvidiv jer su mjerenja početnih

uvjeta često nedovoljno precizna. Zbog toga se određuje remanentni tok s pomoću kojega se pronalazi ovisnost pojave ferorezonancije o početnim uvjetima [6].

3. LABORATORIJSKI SUSTAV, MJERNA OPREMA I POSTUPAK MJERENJA

3.1. Laboratorijski sustav

Model korištenog laboratorijskog sustava za određivanje zaostalog magnetskog toka s pomoću petlje histereze neopterećenog transformatora shematski je prikazan na slici 3.1.

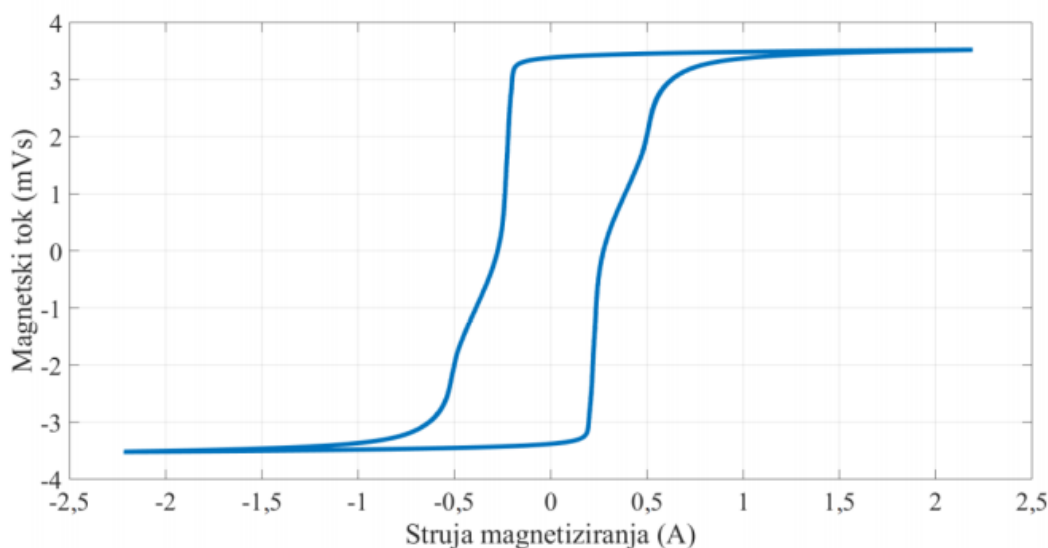


Slika 3.1. Model mjernog kruga.

Model mjernog kruga sastoji se od jednofaznog transformatora s dva namota koji je modeliran savršenim transformatorom postavljenim u seriju s otporom R_T . U seriji s tim, postavljen je i dodatni otpor R_R , te uz to postoje tri izmjenična izvora napajanja (u_1 , u_2 , u_3) i tri sklopke, gdje su sklopka S_1 i S_3 obične mehaničke sklopke, a sklopka S_2 elektronički upravljana sklopka.

Korišteni transformator sadrži toroidnu jezgru napravljenu od M5 magnetskog lima površine poprečnog presjeka 20 cm^2 . Na primarnom namotu ima 47 zavoja, a na sekundarnom 7. Za ožičenja oba namota korištena je trostruka bakrena žica čiji kružni poprečni presjek površine iznosi 1.3 mm^2 . Nazivni napon na primaru transformatora iznosi 30 V, dok je napon na sekundaru 4,5 V. Nazivna struja primarnog namota je 6,5 A, a nazivna struja sekundara 44,5 A. Djelatni otpor primarnog

namota R_T ima vrijednost $0,19 \Omega$, dok njegov induktivitet L iznosi $0,59 \text{ H}$ kada se transformator nalazi u nezasićenom području. Sekundar transformatora je u praznom hodu te ga se koristi samo za snimanje napona na sekundaru transformatora u_s . Karakteristika induktiviteta ovog transformatora prikazana je u φ - i ravnini i predstavlja glavnu petlju histereze.



Slika 3.2. *Petlja histereze.*

Dodatni otpor R_R (Slika 3.3), koji se nalazi u seriji s primarnim namotom transformatora, iznosi $1,22 \Omega$. Njegova uloga je ograničavanje velike vrijednosti struje primara prilikom uklopa na nazivni ili napone veće od nazivnog. U slučaju da se strujni krug projektirao bez dodatnog otpornika, došlo bi do velike vrijednosti udarne struje magnetiziranja koja bi oštetila opremu korištenu u pokusu.



Slika 3.3. Dodatni otpor R_R .

Realizacija sklopki S_1 i S_2 provedena je s pomoću trijaka elektroničkog sklopnog uređaja reguliranog mikrokontrolerom kojeg pokreće softver instaliran na računalu. Valni oblici struje magnetiziranja (i) mjereni su s pomoću diferencijalne aktivne sonde *GW Instek GDP-025*, snimanjem napona na dodatnom otporniku R_R te uz poznavanje Ohmovog zakona za izračunavanje valnih oblika.

Napon na primaru transformatora (u_p) sniman je aktivnom diferencijalnom sondom *GW Instek GDP-025*. Za razliku od napona primara, napon sekundara sniman je pasivnom sondom koja ima omjer 1:1, odnosno napon doveden na DAQ karticu nema ni djelitelja i nema izobličenja. Kod snimljenog napona sekundara bitno je da nema nikakvog izobličenja jer se on integrira da bi se mogao računati magnetski tok koji služi u daljnjem računanju.

Uzorkovanje se vršilo pri frekvenciji od 50 kHz. Osciloskop s priključenim sondama se koristio samo radi kontrole mjerenja koje su dobiveni u *DAQ* softveru.

Za izvor izmjeničnog testnog naponskog signala koristio se programabilni izmjenični izvor *ET System EAC-S2000* nazivne snage 2000 VA.



Slika 3.4. *Izmjenični izvor ET System EAC-S2000.*

3.2. Programski alati

3.2.1 LabVIEW

LabVIEW (od engl. *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) je programski jezik u kojem se s pomoću grafičkih zapisa stvaraju programi što ga razlikuje od ostalih programskih jezika poput C#, C++ i Java u kojima se to radi pisanjem koda u obliku teksta. Može se koristiti na računalima s instaliranim operacijskim sustavima MacOS, Windows ili Linux. Prije svega, LabVIEW je osmišljen za mjerenje i analizu podataka te prezentiranja rezultata korisniku. Njegov dizajn sadrži raznovrsno grafičko sučelje koje korisnicima omogućava jednostavno programiranje, simuliranje i prezentiranje projekta. Sadrži opširne biblioteke za funkcije i potprograme s pomoću kojih pojednostavljuje korisniku pisanje programa. Uz prethodno navedene biblioteke, LabVIEW sadrži i biblioteke za primjenu kodova kojima se prikupljaju podaci multifunkcijske akvizicijske kartice DAQ (engl. *Data Acquisition*), GPIB (engl. *General Purpose Interface Bus*) i serijske kontrole instrumenata. LabVIEW sadrži razne funkcije poput generiranja i obrade signala, statistiku, regresiju, filtre i linearnu algebru, a u izlaznim opcijama se nalaze grafovi i dijagrami.

3.2.2. MATLAB

MATLAB (engl. *Matrix laboratory*) je programski jezik visokih performansi za programiranje. Sadrži alate za računanje, vizualiziranje i programiranje u jednostavnoj programskoj okolini gdje se problemi i rješenja izražavaju jednostavnim matematičkim zapisima. Najčešće se koristi za potrebe matematičkog računanja, razvoja algoritma, modeliranja, simulacija, analiziranja podataka, istraživanja, vizualiziranja te razvoja aplikacija. MATLAB je interaktivan sustav kojim se osnovni podatci zapisuju u nizove za koje nije potrebno dimenzioniranje. Tako se korisniku omogućava rješavanje računalnih problema, posebno onih koji u sebi sadrže matrice i vektore. U ovom programskom jeziku ne postoji strogo pravilo pisanja. Varijable se mogu računati s pomoću drugih funkcija, mogu biti konstantne ili biti prikazane s pomoću neke izlazne funkcije. MATLAB je osmišljen tako da mu osnovna podatkovna struktura bude matrica. Uz matrice i realne brojeve, podržava i kompleksne brojeve i kompleksne matrice. Podržava i korištenje drugih programskih jezika poput C ili Fortrana tako što omogućava pozivanje funkcija i potprograma koji su prethodno napisani u tim programskim jezicima [7].

3.3. Mjerni uređaji

3.3.1. DAQ kartica

Osnovna funkcija DAQ (engl. *Data Acquisiton*) kartice je prikupljanje podataka, odnosno služi, uz korištenje računala, za mjerenje raznih fizikalnih veličina poput struje, napona, temperature i tlaka. Sustav DAQ kartice čine DAQ mjerni sklop, senzor i računalo. DAQ sustavi, za razliku od ostalih tradicionalnih mjernih sustava, bazirani su na osobnim računalima gdje koriste zaslon, snagu procesora i povezivanje računala kako bi pružili fleksibilno i isplativo mjerenje. U radu je korištena DAQ kartica National Instruments NI-USB 6212 [8].



Slika 3.5. DAQ kartica National Instruments NI-USB 6212.

3.3.2. Mjerne sonde

Mjerne sonde se koriste za spajanje osciloskopa u strujni krug tijekom provođenja mjerenja. Sonde se dijele na strujne i naponske. U ovom radu korištena je aktivna diferencijalna sonda GW Instek GDP-025 za mjerenje napona i strujna sonda (klijesta) Tektronix A622 za mjerenje struje.

Strujnom sondom ili strujnim klijestima, na principu magnetske indukcije, mjeri se električna struja. Prolaskom izmjenične struje kroz vodič inducira se promjenjivo magnetsko polje koje je proporcionalno jakosti izmjenične struje. Poznavanjem konstante proporcionalnosti, kalibrira se mjerni instrument i tako prikazuje vrijednost struje. Strujna sonda se otvara poput klijesta i obuhvaća vodič kojim se mjeri struja. Tako se izbjegava prekidanje strujnog kruga i fizički kontakt s vodičem [9]. Može se spojiti na mjerni instrument ili na osciloskop. Tipovi strujnih sondi su strujna klijesta i Rogowski svitak.



Slika 3.6. *Strujna kliješta Tektronix A622.*

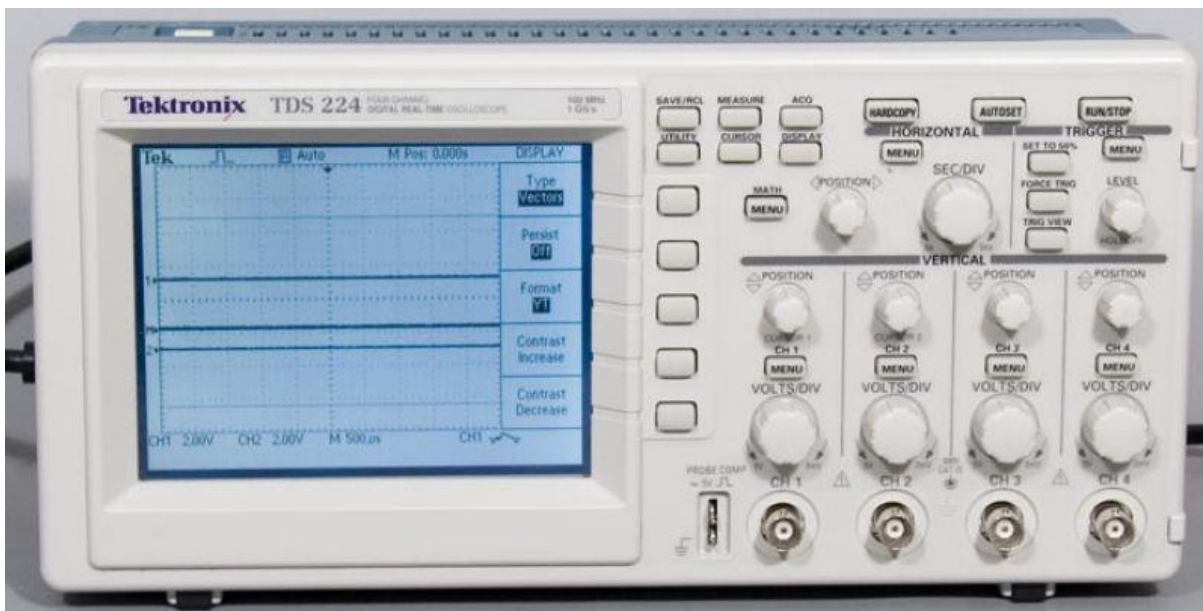
Napon u strujnom krugu može se izmjeriti korištenjem naponske (diferencijalne) sonde. Kako bi se osigurala velika preciznost, niti sonda niti instrument ne smiju utjecati na mjereni strujni krug. To se postiže tako da sonda ima dovoljno veliku impedanciju i svojim paralelnim spajanjem ne opterećuje strujni krug. Korištenje otpornika s iznimno niskim naponskim koeficijentima osigurava visoku točnost i linearnost. Diferencijalna sonda mjeri napon, odnosno diferencijalni signal između dvije točke. Uspoređuje dva signala i odbacuje ih u slučaju ako nemaju identično prigušenje, frekvencijski odziv i vremensko kašnjenje. Diferencijalna signalizacija koristi dva izmjerena signala suprotnih polariteta prijenosa, a svaki od njih se nalazi na svom vodiču [9].



Slika 3.7. Diferencijalna sonda GW – Instek GDP-025.

3.3.3. Osciloskop

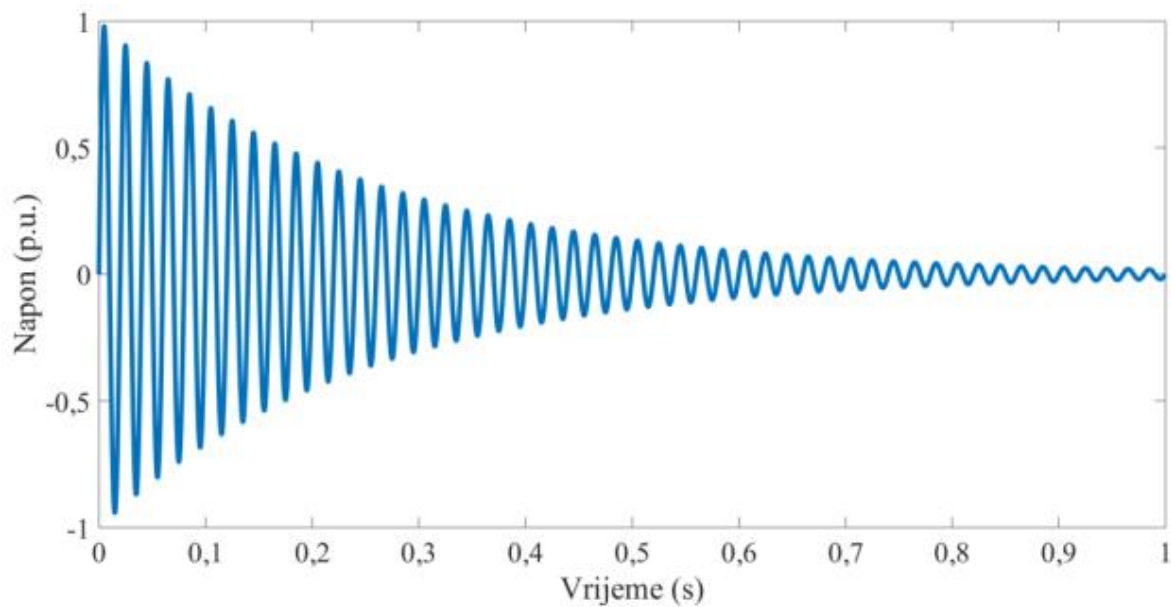
Osciloskop je elektronički instrument koji služi za grafičko prikazivanje i analiziranje izmjeničnih i istosmjernih signala u obliku dvodimenzionalnog grafa jednog ili više signala. Prikazuje izmjenične signale kao funkciju ovisnosti dviju ili više veličina ovisno o broju ulaza osciloskopa ili kao funkciju vremena. Na vertikalnoj osi prikazuje jednu mjerenu veličinu, dok se na horizontalnoj osi prikazuje druga mjerena veličina ili vrijeme. U modernom vremenu koriste se osciloskopi koji s pomoću računala obrađuju i prikazuju valne oblike mjerene veličine [4]. U ovom radu korišten je osciloskop Tektronix TDS 224.



Slika 3.8. Osciloskop Tektronix TDS 224.

3.4. Mjerni postupak

Mjerni postupak izveden je u četiri koraka. Prvi korak je demagnetizacija jezgre transformatora. Demagnetizacija se vršila tako što se vrijednost napona spušta s 36 V do nule u vremenskom intervalu od nekoliko sekundi (Slika 3.9.). Za demagnetizaciju je korišten izmjenični izvor prikazan na slici 3.4, a modeliran je izvorom u_1 (Slika 3.1.). Na izvor se spaja primar transformatora preko obične mehaničke sklopke modelirane sklopkom S_1 . Ostale dvije sklopke, modelirane sa S_2 i S_3 , su otvorene. Demagnetizacija se provodi zbog ubrzanja procesa postavljanja početne vrijednosti magnetskog toka.



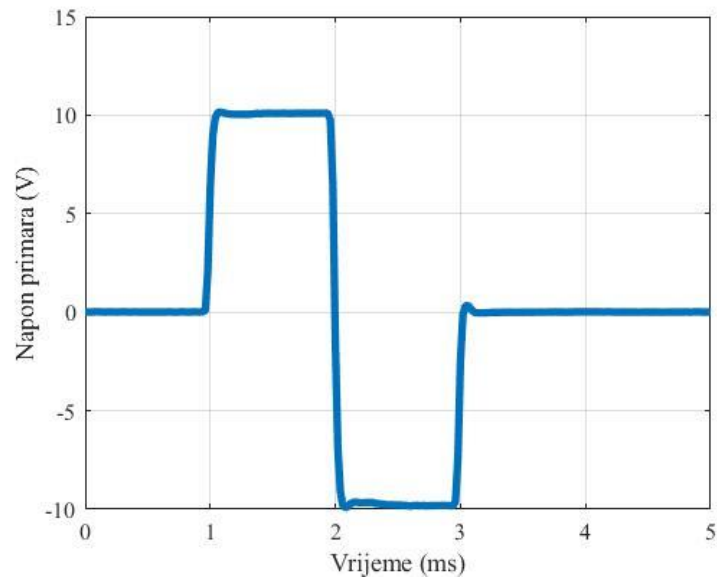
Slika 3.9. *Izmjenična demagnetizacija.*

Drugi korak je postavljanje početne vrijednosti remanentnog toka. U tablici 3.1. prikazane su samo pozitivne vrijednosti remanentnog toka Φ_{R0} zbog simetričnosti petlje histereze. Vrijednosti iz tablice bit će uspoređivane s dobivenim rezultatima kod određivanja parametara.

Tablica 3.1. *Postavljene vrijednosti remanentnog toka Φ_{R0} .*

U_2 (V)	Φ_{R0} (mVs)	U_2 (V)	Φ_{R0} (mVs)
36	2,997	18	1,152
33	2,752	15	0,901
30	2,364	12	0,650
27	2,040	9	0,433
24	1,728	6	0,140
21	1,441	3	0,061

Treći korak je uklapanje transformatora na testni signal. Kao testni signal koristio se izmjenični napon bez istosmjerne komponente. Primijenjena je jedna perioda izmjeničnog napona (pravokutni valni oblik), to jest primijenjena je varijanta s pozitivnom i negativnom funkcijom skoka. Parametri testnog signala su $E = 10$ V i $T = 2$ ms i prikazan je na slici 3.10.



Slika 3.10. Testni naponski signal narinut na primar transformatora

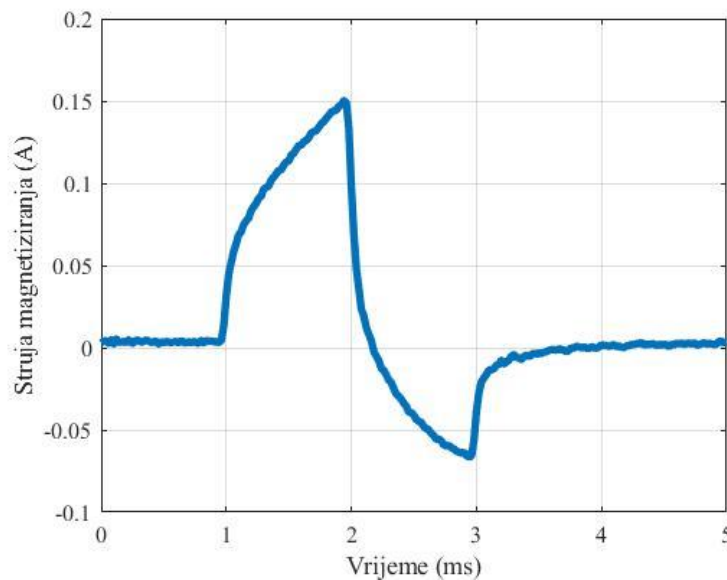
Četvrti i posljednji korak je snimanje valnih oblika struje primara i napona sekundara za svih 25 vrijednosti napona U_2 , te njihova daljnja obrada korištenjem programskim paketa MATLAB i LabVIEW.

4. PARAMETRI

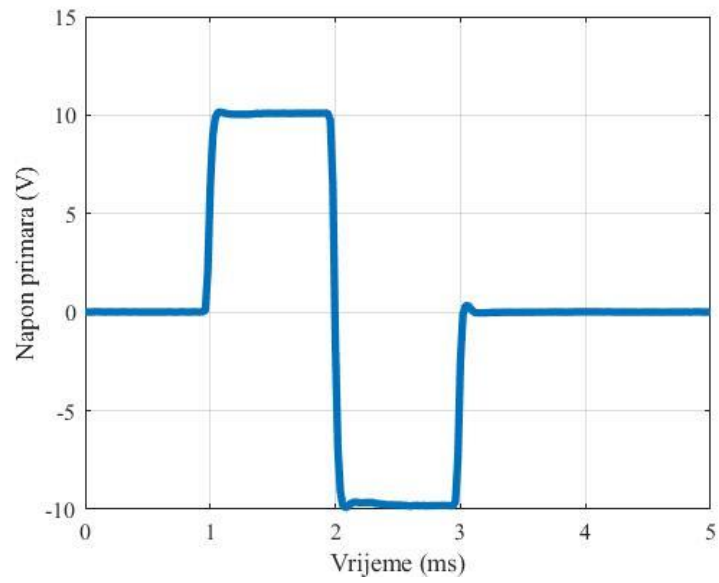
U praksi je skoro pa nemoguće direktno mjeriti remanentni tok zbog toga što je zatvoren u samoj jezgri transformatora. Postoje metode s kojim ga se može neizravno odrediti, ali one imaju svoje nedostatke i potrebno je tražiti nove parametre s pomoću kojih će ga se preciznije i točnije računati. U ovom radu testirana su četiri takva parametra koji su se određivali analiziranjem male petlje histereze.

4.1. Rezultati mjerenja

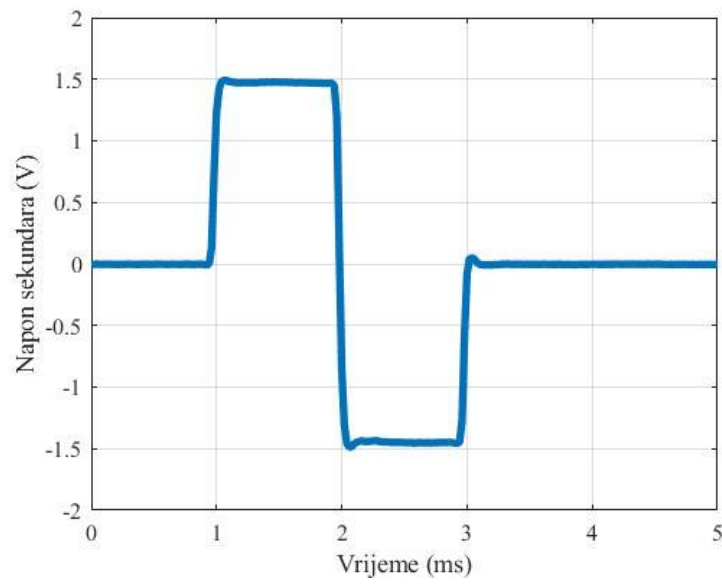
Nakon mjerenja, koje se vršilo 25 puta, za svaki napon dobiveni su valni oblici struje magnetiziranja (i), napona primara (u_p) i sekundara (u_s) i petlja histereze transformatora koja je izvedena obradom u programu MATLAB. Slike 4.1., 4.2., 4.3. i 4.4. prikazuju snimljene i obrađene valne oblike za parametre $U_2 = 30 \text{ V (+)}$, $E = 10 \text{ V}$ i $T = 2 \text{ ms}$.



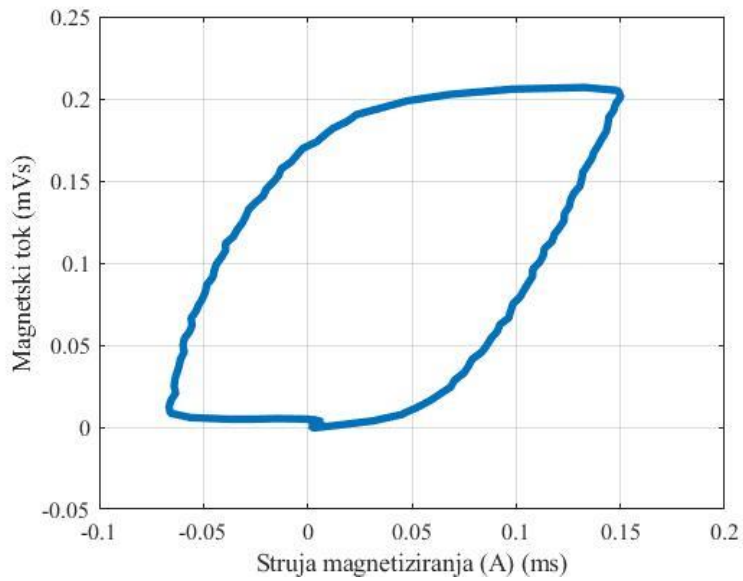
Slika 4.1. Struja magnetiziranja.



Slika 4.2. *Napon primara transformatora.*

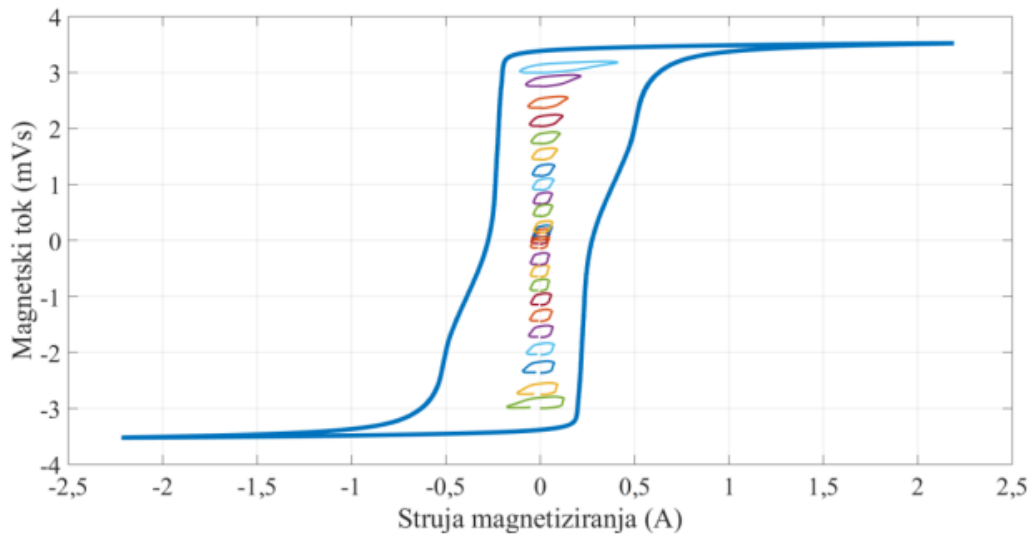


Slika 4.3. *Napon sekundara transformatora.*



Slika 4.4. *Petlja histereze.*

Snimljeni su svi oblici malih petlji histereze u φ -i ravnini za sve efektivne vrijednosti napona U_2 i prikazani su grafičkim prikazom (Slika 4.5)



Slika 4.5. *25 malih petlji histereze u φ -i ravnini.*

Za potrebe računanja u programskom paketu MATLAB izračunate su vrijednosti parametara minimalne i maksimalne vršne struje, te površine lijevo i desno od y osi za svih 25 φ -i karakteristika (petlji histereze). Dobivene vrijednosti prikazane su u tablici 4.1.

Tablica 4.1. *Izmjerene i izračunate vrijednosti parametara.*

Napon U_2 (V)	Minimalna struja (A)	Maksimalna struja (A)	Površina lijevo od y osi	Površina desno od y osi
36 (+)	0,1113	0,4374	0,0108	0,0469
33 (+)	0,0789	0,2235	0,0081	0,0289
30 (+)	0,0665	0,1503	0,0071	0,0211
27(+)	0,0576	0,1227	0,0067	0,0181
24 (+)	0,0489	0,1063	0,0057	0,0163
21 (+)	0,0443	0,0907	0,0052	0,0142
18 (+)	0,0431	0,0770	0,0052	0,0121
15 (+)	0,0414	0,0729	0,0052	0,0115
12 (+)	0,0364	0,0634	0,0047	0,0105
9 (+)	0,0373	0,0661	0,0047	0,0107
6 (+)	0,0369	0,0654	0,0045	0,0107
3 (+)	0,0382	0,0619	0,0048	0,0105
0	0,0464	0,0533	0,0065	0,0088
3 (-)	0,0499	0,0498	0,0070	0,0082
6 (-)	0,0521	0,0480	0,0075	0,0081
9 (-)	0,0529	0,0479	0,0077	0,0082
12 (-)	0,0531	0,0471	0,0078	0,0081
15 (-)	0,0545	0,0471	0,0080	0,0083
18 (-)	0,0513	0,0568	0,0070	0,0099
21(-)	0,0568	0,0614	0,0075	0,0107
24 (-)	0,0632	0,06526	0,0082	0,0117
27 (-)	0,0759	0,0707	0,0097	0,0125
30 (-)	0,0961	0,0721	0,0127	0,0131
33 (-)	0,1314	0,0891	0,0155	0,0164
36 (-)	0,1910	0,1218	0,0203	0,0227

4.2. Parametar I_a

Za proračun parametra I_a korištene su se vrijednosti struja magnetiziranja za svih 25 mjerenja. Za svaku vrijednost parametra potrebne su bile maksimalna (I_{max}) i minimalna (I_{min}) vršna struja magnetiziranja. Kao minimalnu i maksimalnu vršnu vrijednost uzimale su se najniža i najviša točka grafa (Slika 4.1.). Izraz za računanje parametra I_a :

$$I_a = \frac{I_{max}}{I_{min}} \quad (4-1)$$

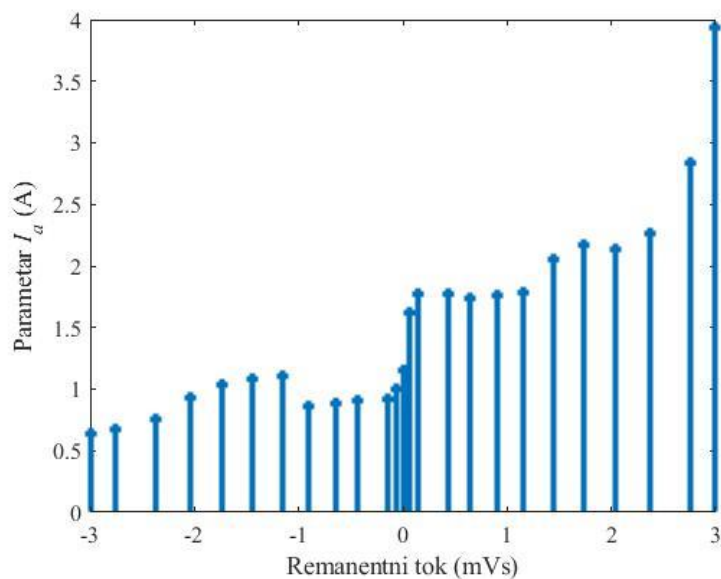
a izračunati rezultati su prikazani u tablici 4.2.

Tablica 4.2. Rezultati za parametar I_a .

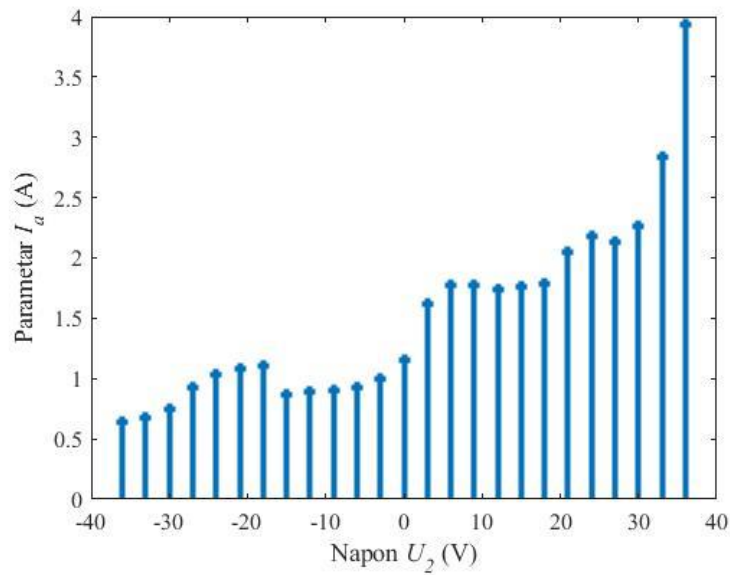
U_2 (V)	Parametar I_a
36 (+)	3,930
33 (+)	2,833
30 (+)	2,260
27(+)	2,130
24 (+)	2,174
21 (+)	2,047
18 (+)	1,787
15 (+)	1,761
12 (+)	1,741
9 (+)	1,772
6 (+)	1,772
3 (+)	1,620
0	1,149
3 (-)	0,999
6 (-)	0,921
9 (-)	0,905
12 (-)	0,887

15 (-)	0,864
18 (-)	1,107
21(-)	1,081
24 (-)	1,032
27 (-)	0,931
30 (-)	0,750
33 (-)	0,678
36 (-)	0,638

Nadalje, vrijednosti izračunatih parametra prikazane su kao funkcija u ovisnosti o postavljenim početnim vrijednostima remanentnog toka (Slika 4.6.) i u ovisnosti o svim efektivnim vrijednostima napona izmjeničnog izvora U_2 (Slika 4.7.).



Slika 4.6. Vrijednost parametra I_a za sve postavljene početne vrijednosti remanentnog toka.



Slika 4.7. Vrijednost parametra I_a za sve efektivne vrijednosti napona U_2 .

Iz priloženih grafova na slikama 4.6. i 4.7. i vrijednostima u tablici 4.2. može se primijetiti da parametar ima određen broj nedostataka. Najveći nedostatak je nesimetrija vrijednosti kod pozitivnih i negativnih efektivnih vrijednosti napona U_2 (Slika 4.7.). Uz to, parametar ne pokazuje informaciju o predznaku i izračunate vrijednosti remanentnog toka nisu jednake postavljenim vrijednostima. Isto tako, vrijednosti parametra u točkama $U_2 = 21$ V (–) i $U_2 = 0$ V (–) približno su jednake.

Nadalje, usporedbom vrijednosti lijevo i desno od točke $U_2 = 0$ V može se primijetiti da su vrijednosti parametra na desnoj strani grafa skoro dvostruko veće iako bi međusobno trebale biti jednake, odnosno simetrične. Iz svega navedenog, može se zaključiti kako parametar I_a nije pogodan za računanje remanentnog toka u jezgri transformatora.

4.3 Parametar P_b

Za izračun parametra P_b korištene su površine malih petlji histereze, odnosno površine lijevo i desno od y osi. Oblik, a samim time i površina petlje histereze prikazani su kao ovisnost magnetskog toka o struji magnetiziranja. Parametar se računao po izrazu:

$$P_b = \frac{P_{desno}}{P_{lijevo}} \quad (4-2)$$

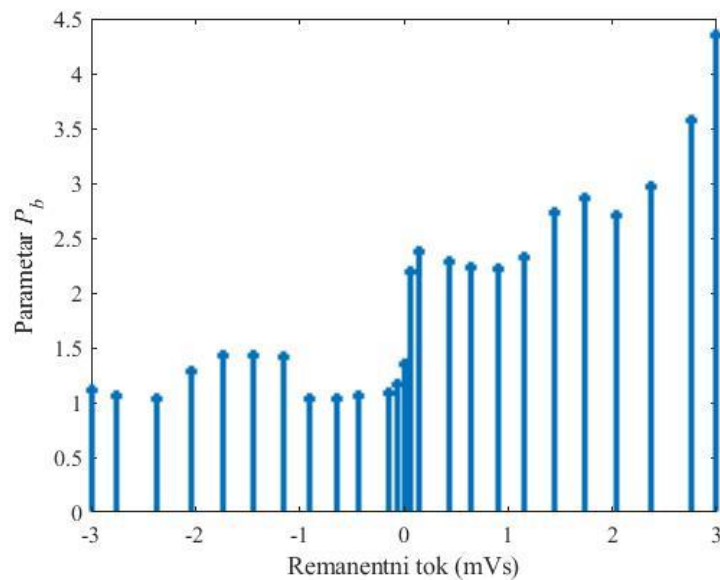
Izračunati rezultati prikazani su u tablici 4.3.

Tablica 4.3. Rezultati za parametar P_b .

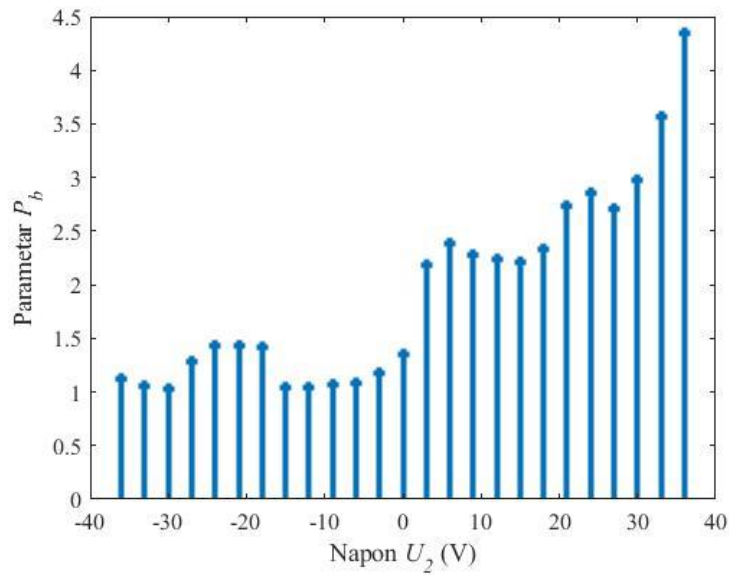
U_2 (V)	Parametar P_b
36 (+)	4,343
33 (+)	3,568
30 (+)	2,972
27(+)	2,701
24 (+)	2,859
21 (+)	2,731
18 (+)	2,327
15 (+)	2,212
12 (+)	2,234
9 (+)	2,277
6 (+)	2,378
3 (+)	2,188
0	1,354
3 (-)	1,171
6 (-)	1,080
9 (-)	1,065
12 (-)	1,038
15 (-)	1,037

18 (-)	1,414
21(-)	1,427
24 (-)	1,427
27 (-)	1,289
30 (-)	1,031
33 (-)	1,058
36 (-)	1,118

Parametar P_b je grafički prikazan u ovisnosti o postavljenim početnim vrijednostima remanentnog toka (Slika 4.8.) i u ovisnosti o efektivnim vrijednostima napona izmjeničnog izvora napona U_2 (Slika 4.9.).



Slika 4.8. Vrijednost parametra P_b za sve postavljene početne vrijednosti remanentnog toka.



Slika 4.9. Vrijednost parametra P_b za sve postavljene početne vrijednosti remanentnog toka.

Kod parametra P_b dobiveno je 25 različitih vrijednosti, a jedan od nedostataka je njihova nesimetrija kod pozitivnih i negativnih efektivnih vrijednosti napona U_2 . Parametar ne daje informaciju o predznaku remanentnog toka i vrijednosti parametra ne odgovaraju traženim vrijednostima postavljenog remanentnog toka. Na primjer, ukoliko usporedimo vrijednosti parametra kod točki napona $U_2 = 24$ V (+) i $U_2 = 24$ V (-), kod pozitivne vrijednosti napona U_2 su gotovo dvostruko veće nego kod negativne vrijednosti napona. Također, vrijednosti parametra u točkama $U_2 = 3$ V (-), 18 V (-), 21 V (-), 24 V (-) i 27 V (-) su veće od vrijednosti u točki $U_2 = 36$ V (-), dok su vrijednosti u točkama $U_2 = 9$ V (+), 12 V (+), 15 V (+) i 18 V (+) manje u odnosu na vrijednost parametra dobivene u točki $U_2 = 6$ V (+). Navedene vrijednosti ne odgovaraju vrijednostima postavljenog remanentnog toka. Zbog spomenutih nedostataka niti ovaj parametar nije koristan za računanje remanentnog toka u jezgri transformatora.

4.4 Parametar P_c

Kod proračuna parametra P_c , kao i kod prethodnog parametra, korištene su površine lijeve i desne strane malih petlji histereze, samo što se u ovom slučaju koristila njihova razlika, a ne omjer. Izraz po kojem se računao glasi:

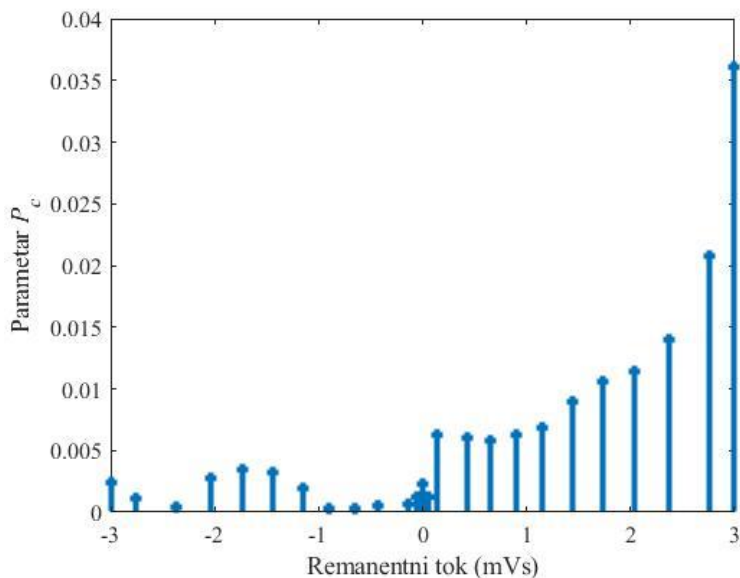
$$P_c = P_{desno} - P_{lijevo} \quad (4-3)$$

Vrijednosti parametra P_c zapisane su u tablici 4.4.

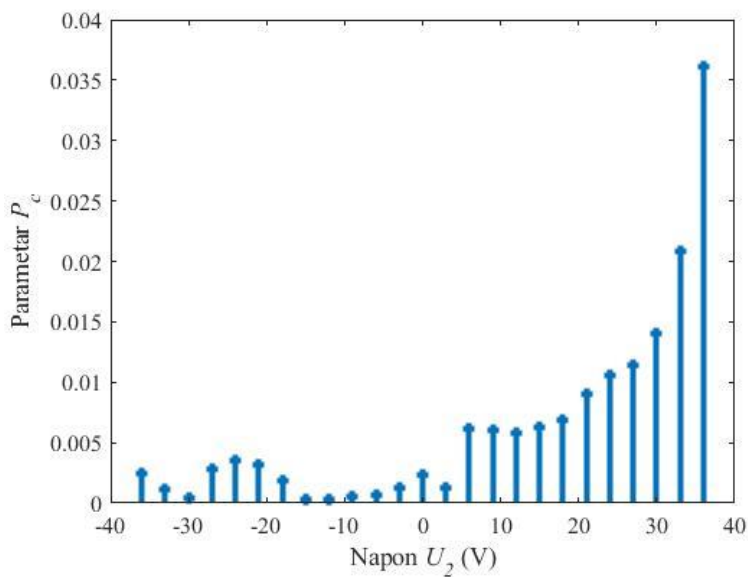
Tablica 4.4. Rezultati za parametar P_c .

U_2 (V)	Parametar P_c
36 (+)	0,0361
33 (+)	0,0208
30 (+)	0,0140
27(+)	0,0114
24 (+)	0,0106
21 (+)	0,0090
18 (+)	0,0069
15 (+)	0,0063
12 (+)	0,0058
9 (+)	0,0060
6 (+)	0,0062
3 (+)	0,0012
0	0,0023
3 (-)	0,0012
6 (-)	0,0006
9 (-)	0,0005
12 (-)	0,0003
15 (-)	0,0003
18 (-)	0,0019
21(-)	0,0032
24 (-)	0,0035
27 (-)	0,0028
30 (-)	0,0004
33 (-)	0,0011
36 (-)	0,0024

Kao i kod prethodno prikazanih parametra I_a i P_b , vrijednosti parametra P_c su grafički prikazane kao funkcija u ovisnosti o postavljenim početnim vrijednostima remanentnog toka (Slika 4.10) i u ovisnosti o svim efektivnim vrijednostima napona izmjeničnog izvora U_2 (Slika 4.11.).



Slika 4.10. Parametar P_c u ovisnosti o naponu postavljenom remanentnom toku.



Slika 4.11. Vrijednost parametra P_c za sve efektivne vrijednosti napona U_2 .

Nedostatci kod ovog parametra P_c slični su kao i kod prethodna dva. Prisutna je nesimetrija s obzirom na točku napona $U_2 = 0$ V. Parametar ne prikazuje negativne vrijednosti, odnosno ne daje informaciju o predznaku remanentnog toka. Vrijednosti parametra u točkama $U_2 = 36$ V (–) i $U_2 = 0$ V približno su jednake, a ne smiju biti. Usto, vrijednosti parametra u točkama $U_2 = 18$ V (–), 21 V (–), 24 V (–) i 27 V (–) po iznosu odskaču od ostalih negativnih efektivnih vrijednosti napona U_2 . Za razliku od parametara I_a i P_b , parametar P_c u više točaka ima vrijednost približnu nuli, što znači da su površine P_{lijevo} i P_{desno} skoro jednake, to jest da vršna maksimalna vrijednost struje i minimalna vrijednost struje imaju približno jednaku vrijednost. Parametar po svojoj vrijednosti ne daje tražene rezultate i zbog toga ni ovaj parametar ne zadovoljava uvjete za računanje remanentnog magnetskog toka u jezgri transformatora.

4.5 Parametar W_Q

Za računanje četvrtog parametra bile su potrebne površine malih petlji histereze u φ - i ravnini. Vrijednosti površina se nalaze u tablici 4.5.

Tablica 4.5. Vrijednosti površina malih petlji histereze.

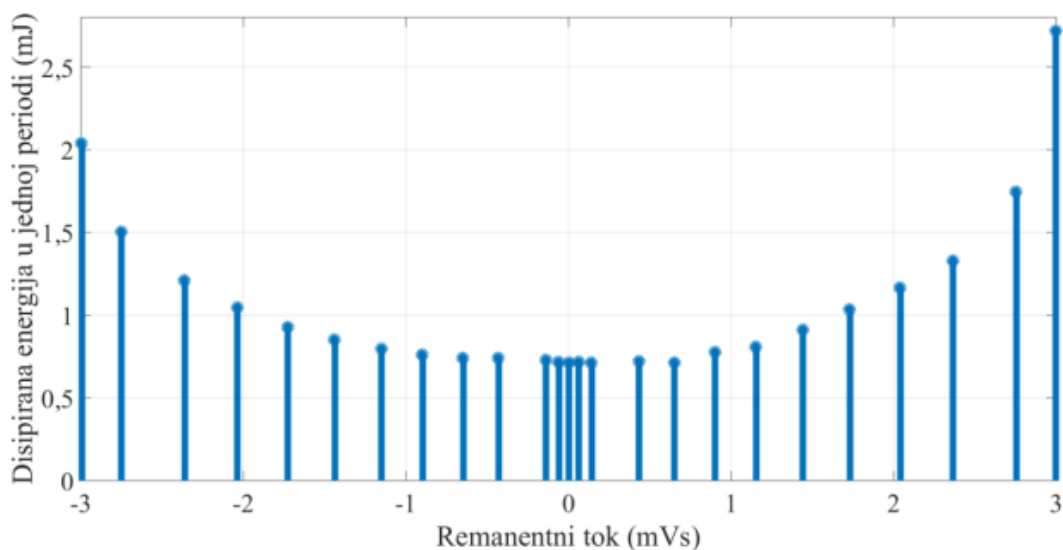
U_2 (V)	Površina
36 (+)	0,0577
33 (+)	0,0370
30 (+)	0,0282
27(+)	0,0248
24 (+)	0,0220
21 (+)	0,0194
18 (+)	0,0173
15 (+)	0,0167
12 (+)	0,0152
9 (+)	0,0154
6 (+)	0,0152
3 (+)	0,0153

0	0,0153
3 (-)	0,0152
6 (-)	0,0156
9 (-)	0,0159
12 (-)	0,0159
15 (-)	0,0163
18 (-)	0,0169
21(-)	0,0182
24 (-)	0,0199
27 (-)	0,0222
30 (-)	0,0258
33 (-)	0,0319
36 (-)	0,0430

Parametar W_Q se računao kao umnožak broja zavoja primarnog namota i površine male petlje histereze u φ - i ravnini. Taj umnožak predstavlja električnu energiju pretvorenu u toplinsku energiju (W) u jednoj periodi (T) testnog signala.

$$W = \int_0^T \frac{N_1}{N_2} u_s(t) i(t) dt = \int_0^T u_L(t) i(t) dt = \int_0^T N_1 \frac{d}{dt} i(t) dt = N_1 \int_{\varphi(0)}^{\varphi(T)} i(\varphi) d\varphi \quad (4-4)$$

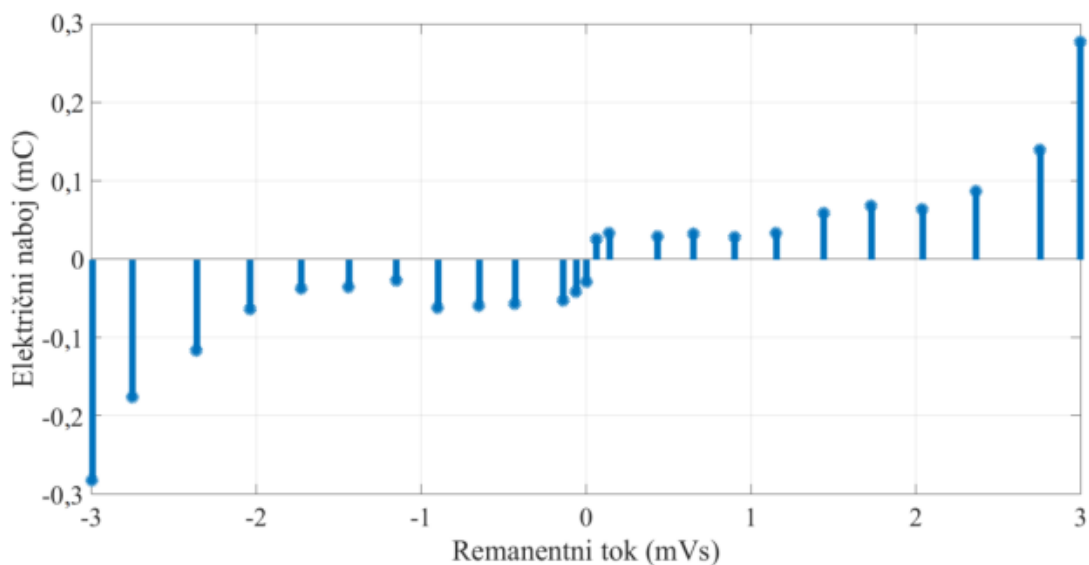
Rezultat disipirane energije (W) za postavljene vrijednosti remanentnog toka prikazane su grafičkim prikazom (Slika 4.12).



Slika 4.12. Disipirana energija u jednoj periodi (W).

Promatrajući graf na slici 4.12. može se zaključiti da se površina male petlje histereze mijenja u ovisnosti o remanentnom magnetskom toku u jezgri transformatora. Nedostatak parametra disipirane energije je što ne daje informaciju o predznaku remanentnog toka. Remanentni tok bi trebao imati pozitivnu i negativnu vrijednost. Iz tog razloga je bilo potrebno koristiti dodatni parametar. Korišten je električni naboj (Q) prenesen kroz primarni namot od trenutka uklapanja na testni signal do nekog trenutka $T < t_1$, odnosno površina ispod valnog oblika struje magnetiziranja:

$$Q = \int_0^{t_1} i(t) dt \quad (4-5)$$



Slika 4.13. Vrijednosti električnog naboja (Q) za parametre $E = 10 \text{ V}$, $T = 2 \text{ ms}$ i $t_1 = 3T$.

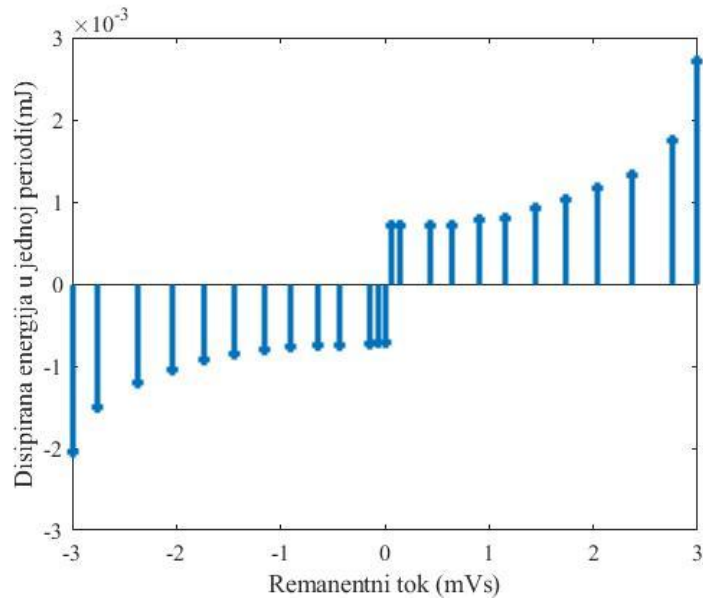
Iz prikazanog grafa na slici 4.13. vidljivo je da se električni naboj mijenja u ovisnosti o remanentnom toku te da električni naboj daje točnu informaciju o predznaku remanentnog toka. Pošto je naboj potreban samo zbog informacije o predznaku dijeljen je sa svojom apsolutnom vrijednosti po izrazu:

$$Q = \frac{q}{|Q|} \quad (4-6)$$

Parametar W_Q računat će se kao umnožak površine male petlje histereze pomnoženom s brojem zavoja primarnog namota (W) i parametrom Q , odnosno njegovim predznakom:

$$W_Q = \frac{Q}{|Q|} \cdot W = \frac{\int_0^{t_1} i(t) dt}{\left| \int_0^{t_1} i(t) dt \right|} \cdot \int_0^T \frac{N_1}{N_2} u_s(t) i(t) dt = \frac{\int_0^{t_1} i(t) dt}{\left| \int_0^{t_1} i(t) dt \right|} \cdot N_1 \int_{\varphi(0)}^{\varphi(T)} i(\varphi) d\varphi \quad (4-7)$$

Vrijednosti parametra W_Q prikaznai su na slici 4.14.



Slika 4.14. Vrijednosti parametra W_Q .

Iz grafa na slici 4.14. može se primijetiti da parametar W_Q daje zadovoljavajuće rezultate. Ispunjava sve tražene uvijete poput predznaka i vrijednosti koji su zapisani u tablici 4.6.

Tablica 4.6. Izračunate vrijednosti parametra W_Q .

U_2 (V)	Parametar W_Q (μ J)
36 (+)	2718,1
33 (+)	1743,6
30 (+)	1329,5
27(+)	1165,6
24 (+)	1033,9
21 (+)	913,2
18 (+)	806,4
15 (+)	778,4
12 (+)	712,0
9 (+)	719,1
6 (+)	712,9
3 (+)	716,5
0	-712,3

3 (-)	-718,6
6 (-)	-730,1
9 (-)	-742,6
12 (-)	-739,4
15 (-)	-759,9
18 (-)	-794,8
21(-)	-850,3
24 (-)	-928,3
27 (-)	-1047,8
30 (-)	-1209,6
33 (-)	-1501,7
36 (-)	-2038,1

Izmjerene vrijednosti parametra W_Q , za svih 25 malih petlji histereze, odgovaraju vrijednostima prethodno postavljenog početnog remanentnog magnetskog toka. Nedostatak je razlučivost pri nižim vrijednostima remanentnog toka, dok je razlučivost pri višim vrijednostima remanentnog toka daleko bolja, što je iznimno važno zbog smanjenja udarne struje.

5. Zaključak

Remanentni ili zaostali magnetski tok u jezgri transformatora može stvarati velike probleme u radu nekog elektroenergetskog sustava. Poznavanjem njegove vrijednosti mogu se smanjiti nepoželjne pojave poput udarne struje, sprječavanja zasićenja jezgre strujnog transformatora i ferorezonancije.

U ovom radu objašnjen je postupak računanja vrijednosti remanentnog magnetskog toka koji se pojavljuje u jezgri neopterećenog transformatora nakon njegovog isklopa. Za potrebe računanja mjerili su se napon sekundara i struja magnetiziranja. Također, određivali su se parametri koji bi se mogli koristiti u njegovom izračunu.

Remanentni magnetski tok određivao se u tri koraka. Prvo se obavljala demagnetizacija, koja je potrebna za drugi korak odnosno postavljanje vrijednosti remanentnog toka u jezgri. Na kraju se transformator uklapao na testni naponski signal. Za sva četiri parametra bilo je potrebno mjeriti struju magnetiziranja nakon uklopa na testni signal i napon neopterećenog sekundara.

U radu su računata četiri parametra od kojih samo jedan daje zadovoljavajuće rezultate. Prva tri, odnosno parametri I_a , P_b i P_c ne zadovoljavaju zbog toga što vrijednosti parametara u točkama pozitivnih i negativnih efektivnih vrijednosti napona U_2 nisu simetrične. Također, ne daju informaciju o predznaku remanentnog toka i uz sve prethodne nedostatke, nijedan parametar ne prikazuje vrijednosti jednake prethodno postavljenim vrijednostima remanentnog toka. Kod parametra W_Q rezultati zadovoljavaju, odnosno izmjereni remanentni tok jednak je postavljenom. S pomoću parametra W_Q mogu se precizno i efikasno izračunati vrijednosti remanentnog toka. U sva četiri parametra bilo je potrebno mjeriti struju magnetiziranja nakon uklopa na testni signal i napon neopterećenog sekundara. Pošto parametri I_a , P_b i P_c nisu zadovoljili tražene rezultate, koristio se parametar W_Q . Parametar W_Q ima dva nedostatka, razlučivost pri niskim vrijednostima remanentnog toka i potreba za uspostavljanjem funkcije u kojoj remanentni tok ovisi o parametru W_Q . Prednost

metode je razlučivost pri višim vrijednostima remanentnog toka što je korisno kod smanjenja udarnih struja magnetiziranja.

Literatura

- [1] Kuzmanović, B. Osnove elektrotehnike I Zagreb: Element, 2000.
- [2] U. Parikh, B. R. Bhalja, “Mitigation of magnetic inrush current during controlled energization of coupled un-loaded power transformers in presence of residual flux without load side voltage measurements”, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 76, pp. 156–164, 2016.
- [3] C. K. Cheng, J. F. Chen, T. J. Liang, S. D. Chen, “Transformer design with consideration of restrained inrush current”, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 28, no. 2, pp. 102– 108, 2006.
- [4] P. Amiri, M. Akhbari, “Transient current limiter for suppressing transformer inrush, motor starting and fault currents in power system”, *IET Electr. Power Appl.*, vol. 11, no. 3, pp. 423–433, 2017.
- [5] A. A. Abdoos, “Detection of current transformer saturation based on variational mode decomposition analysis”, *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 11, pp. 2658–2669, 2016.
- [6] M. Rioual, P. Guinic, D. Laval, M. Schäfer, M. A. Abdelghani, N. Schäfer, “Modeling of the energization of a power transformer in a 110 kV network and its validation by on site tests. Description of ferroresonance phenomena involved and means to avoid them”, *IEEE Power Energy Soc. 2008 Gen. Meet. Convers. Deliv. Electr. Energy 21st Century, PES*, 2008.
- [7] The Mathworks Inc.(1994), Mathworks, www.mathworks.com/products/matlab.html . Zadnja posjeta 13.9.2021.
- [8] National Instruments (2019), www.ni.com , zadnja posjeta 13.9.2021.
- [9] C. F. Coombs (1994.), *Electronic instrument handbook*

SAŽETAK

U ovom radu je objašnjen pojam remanentnog magnetskog toka. Opisan je laboratorijski sustav i postupak mjerenja, te su prikazani rezultati mjerenja. Nakon mjerenja vršio se proračun te su određena četiri parametra i objašnjena je njihova moguća upotreba.

Ključne riječi: remanentni magnetski tok, udarna struja magnetiziranja, transformator, napon sekundara, petlja histereze.

ABSTRACT

This paper explains the concept of residual magnetic flux. Laboratory system, and the measurement procedure are described, the measurement results are shown. After the measurement the calculation was performed and four parameters were determined and their possibility of use was explained. Everything is shown in the pictures, and the values are written in tables.

Key words: residual magnetic flux, magnetizing inrush current, transformer, secondary voltage, hysteresis loop.

ŽIVOTOPIS

Marijan Oršulić rođen je 21. prosinca 1996. godine u Vinkovcima. Završava Osnovnu školu Josipa Kozarca u Vinkovcima. Nakon toga, 2011. godine upisuje Tehničku školu Ruđera Boškovića u Vinkovcima sa završenim smjerom tehničar za mehatroniku. 2015. godine upisuje preddiplomski sveučilišni studij smjera Elektrotehnika na Elektrotehničkom fakultetu, odnosno današnjem Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, te se na drugoj godini opredjeljuje na smjer Elektroenergetika. 2019. godine završava preddiplomski studij i upisuje sveučilišni diplomski studij smjera Elektroenergetika na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija.

U Osijeku 6. listopada 2021.

Marijan Oršulić
